

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a),
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir de
10/05/2021.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS DE
SENSOR PIEZELÉTRICO NA DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES
AUTO-EXCITADAS (*CHATTER*) NO PROCESSO DE
RETIFICAÇÃO**

ROGÉRIO THOMAZELLA

Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia de Bauru/ FEB da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - UNESP, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação

Linha de pesquisa: Mecatrônica

Bauru - SP
Maio/2019

Rogério, Thomazella.

Técnicas de processamento digital de sinais de sensor piezolétrico na detecção de vibrações auto-excitadas (chatter) no processo de retificação/ Rogério Thomazella, 2019

94 f. : il.

Orientador: Paulo Roberto de Aguiar

Tese (Doutorado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019

1. Vibração auto-excitada. 2. Chatter na retificação. 3. Análise de tempo-frequência. 4. Monitoramento de vibrações. 5. Processamento de sinais
I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DE ROGERIO THOMAZELLA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 10 dias do mês de maio do ano de 2019, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Diretoria Técnica de Informática da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ do(a) Engenharia / Centro Universitário de Lins - UNILINS, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da TESE DE DOUTORADO de ROGERIO THOMAZELLA, intitulada **TÉCNICAS DE PROCESSAMENTO DIGITAL DE SINAIS DE SENSOR PIEZELÉTRICO NA DETECÇÃO DE VIBRAÇÕES AUTO-EXCITADAS (CHATTER) NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**. Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO _____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. PAULO ROBERTO DE AGUIAR

Prof. Dr. JOSÉ ALFREDO COVOLAN ULSON

Prof. Dr. THIAGO VALLE FRANÇA

Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA

Prof. Dr. BRENO ORTEGA FERNANDEZ

À minha esposa Bruna e minha filha Florenza

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me conceder a vida, as alegrias e nas tristezas, mas, sobretudo por guiar me no caminho da honestidade, da luz e da paz, como diz o evangelho: “Jesus, manso e humilde de coração, fazei nosso coração semelhante ao vosso” (MT 11,29).

À minha família, especialmente aos meus pais Clóvis e Luzia, por todo amor, força e perseverança por toda vida. Aos meus irmãos, cunhadas e sobrinhos (as) e, principalmente, à minha querida e amada esposa Bruna e minha filha Florenza que, com o maior amor do mundo, tanto me apoiaram e me deram forças para trilhar este caminho.

Em especial ao meu orientador, amigo e irmão Prof. Paulo Roberto de Aguiar pela orientação, ensinamentos, conselhos, broncas (e não foram poucas) durante todo curso e, principalmente, pelo companheirismo e cumplicidade adquiridos ao longo destes anos.

Aos amigos e colegas de laboratório aos quais nunca vou esquecer: Fábio Dotto, Wenderson Lopes, Felipe Alexandre, Pedro de Oliveira e tantos outros pela ajuda, conversas e seus aconselhamentos.

Agradeço também a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A Universidade Estadual Paulista (UNESP), FEB - Campus de Bauru, por permitir e tornar possível a realização deste trabalho, aos docentes, funcionários e discentes do Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS) e do Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA).

A Faculdade de Tecnologia de Bauru – Fatec Bauru e a Anhanguera Educacional – Kroton pelo apoio e pela cessão de horário de forma a possibilitar a realização deste trabalho.

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem se atreve. A vida é muita para ser insignificante.” (Charles Chaplin)

RESUMO

O *chatter* corresponde a movimentos instáveis e caóticos no sistema de usinagem, resultando em flutuação das forças de corte e na impressão de ondulações na superfície da peça usinada. É um fenômeno indesejável ao processo de usinagem, especialmente ao processo de retificação, pois a sua ocorrência acentuada resulta em um produto acabado com tolerâncias dimensionais e geométricas fora dos padrões, ou até mesmo em danos irreversíveis, como por exemplo, alteração na dureza, alta rugosidade e queima superficial da peça usinada. Na literatura, poucos trabalhos tratam da análise e monitoramento do *chatter* com técnicas de processamento digital de sinais, especialmente de aceleração. O objetivo desse trabalho é propor uma nova técnica de processamento digital utilizando os sinais de aceleração baseados no cálculo da STFT - *Short Time Fourier Transform* (Transformada de Fourier de curta duração) e na estatística Relação de Potência (ROP – *ratio of power*), com a finalidade de detecção do fenômeno de *chatter* na retificação tangencial plana com rebolo superabrasivo de nitreto cúbico de boro (CBN) e óxido de alumínio. Para tanto, ensaios de retificação foram realizados em corpos de prova de aço ABNT 1045. Um acelerômetro piezelétrico foi acoplado ao suporte das peças e sinais de aceleração foram coletados à uma frequência de amostragem de 2MHz. Dentre as variáveis de saída, obteve-se a dureza Vickers (HV), rugosidade média (R_a) e a análise microestrutural das peças retificadas. Os sinais de aceleração foram processados por meio técnicas de processamento digital baseadas no cálculo da STFT e da ROP resultando na obtenção das características de tempo e frequência relacionadas ao fenômeno de *chatter*. Os resultados mostraram que, por meio da técnica proposta, foi possível caracterizar, ao longo do tempo, os padrões espectrais de uma determinada banda de frequência diretamente relacionada ao fenômeno *chatter*. Verificou-se que os padrões observados possuíam uma relação direta e significativa com as alterações de rugosidade e de dureza das peças usinadas. Portanto, conclui-se que a metodologia apresentada foi capaz de fornecer diretrizes para um sistema de monitoramento eficaz para a detecção do fenômeno de *chatter* no processo de retificação plana.

Palavras-chave: vibração auto-excitada, *chatter* na retificação, análise de tempo-frequência, monitoramento de vibrações, processamento de sinais.

ABSTRACT

Chatter corresponds to unstable and chaotic movements in the machining system, resulting in fluctuation of the cutting forces. It is a serious and undesired physical phenomenon that occurs in the grinding process during parts manufacturing. The intense occurrence of this phenomenon during machining can generate a finished part outside the dimensional and geometric tolerances or even cause irreversible damage, such as: changes to the hardness, high surface roughness, and thermal damages to the ground part. Few vibration signal processing techniques have been proposed for monitoring chatter during grinding. Thus, the objective of this study is to propose and validate a new vibration signal processing technique based on the short-time Fourier transform (STFT) and the ratio of power (ROP) statistic for the detection of chatter during the tangential surface grinding of ABNT 1045 steel with different grinding wheels. Experimental grinding tests were conducted, and the vibration signals were recorded at 2 MHz. The Vickers hardness (HV), roughness (R_a) and metallography of the ground workpiece surfaces were performed. Subsequently, a digital processing technique based on the STFT and ROP was applied to the vibration signals to extract the characteristics of the chatter in the grinding process. The results show that this technique can be used to characterize over time the spectral patterns of a frequency band related to chatter. The observed patterns have a strong relationship with the changes in the R_a and hardness of the machined workpieces. Therefore, the presented methodology is capable of providing a roadmap for an effective grinding chatter monitoring system.

Keywords: chatter in grinding, time-frequency analyses, ratio of power, vibration signals, monitoring.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	13
1.1 Motivação e justificativa	13
1.2 Objetivos.....	16
1.3 Organização do trabalho.....	16
1.4 Publicações obtidas	17
CAPÍTULO 2 - ESTADO DA ARTE	19
2.1 O processo de retificação.....	19
2.2 Visão geral das operações de retificação.....	21
2.2.1 Rebolos	22
2.2.2 A operação de dressagem	24
2.3 Principais parâmetros do processo de retificação.....	25
2.3.1 Profundidade de corte (a)	26
2.3.2 Velocidade de corte (v_s).....	26
2.3.3 Velocidade da peça (v_w).....	27
2.3.4 Espessura equivalente de corte (h_{eq}).....	27
2.4 Variáveis de saída no processo de retificação	28
2.4.1 Rugosidade	28
2.4.2 Força e potência na retificação	30
2.4.3 Dureza Vickers	31
2.4.4 Metalografia.....	32
2.5 Vibrações no processo de retificação	33
2.5.1 Fenômeno de <i>chatter</i>	35
2.6 Monitoramento do processo de retificação.....	37
2.6.1 Monitoramento indireto por sensores	39
2.6.2 Técnicas de processamento de sinais e tomada de decisão	40
2.7 Razão de potência (ROP)	42
2.8 Transformada de Fourier de curta duração (STFT).....	44
2.9 Monitoramento do fenômeno de <i>chatter</i>	45
2.9.1 Detecção do fenômeno de <i>chatter</i>	46
2.9.2 Medição de vibração.....	48

2.9.3 Acelerômetros.....	49
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	52
3.1 Material e equipamentos.....	52
3.1.1 Procedimentos adotados para realização dos ensaios experimentais	52
3.1.2 Sistema de aquisição de dados	54
3.2 Integridade superficial das peças retificadas	55
3.3 Análise em tempo-frequência via STFT e ROP	57
3.3.1 Potência do sinal para uma dada banda de frequência calculada por meio da SFTF	57
3.3.2 Espectro de frequência baseado na STFT.....	57
3.3.3 A ROP baseada na STFT.....	58
3.4 Aplicação da ROP_{STFT} para o monitoramento do <i>chatter</i>	58
3.5 Verificação experimental do método proposto.....	60
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1 Resultados dos ensaios experimentais: aço ABNT 1045 e rebolo CBN.....	62
4.1.1 Inspeção visual e análise metalográfica.....	62
4.1.2 Resultados da aplicação da STFT.....	64
4.1.3 Resultados da aplicação da ROP_{STFT}	66
4.2 Verificação do método: aço ABNT 1045 e rebolo de óxido de alumínio	71
4.2.1 Inspeção visual e análise metalográfica.....	71
4.2.2 Resultados da aplicação da STFT para os ensaios de verificação	73
4.2.3 Resultado da aplicação da ROP_{STFT} para os ensaios de verificação do método proposto.....	74
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	79
5.1 Conclusões.....	79
5.2 Trabalhos futuros.....	81
REFERÊNCIAS	82
ANEXOS	91
ANEXO 1 – Curva de calibração do acelerômetro e módulo amplificador	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Decomposição de processos de retificação.....	20
Figura 2-Exemplo do processo de retificação plana.....	21
Figura 3- Composição da retificação plana	22
Figura 4-Fotografia de rebolos (a); principais componentes de um rebolo (b).....	23
Figura 5- Exemplo da operação de dressagem com diamante de ponta única (a); ângulo relativo entre o dressador e o rebolo (b).....	25
Figura 6-Principais parâmetros do processo de retificação	25
Figura 7- Rugosidade média, picos e vales topográficos	28
Figura 8- Forças na retificação	30
Figura 9- Esquema de indentador de diamante Vickers	31
Figura 10- Vibrações no processo de retificação.....	34
Figura 11- Representação esquemática do fenômeno de <i>chatter</i> na retificação.....	35
Figura 12- Ondulações geradas por <i>chatter</i> na superfície de uma peça que sofreu queima e oxidação	36
Figura 13- Sinais mensuráveis no processo de retificação e seus alvos	40
Figura 14-Técnicas de processamento de sinais para extração de características	41
Figura 15- Relação entre velocidade, descolamento e aceleração.....	48
Figura 16- Cadeia de medição da vibração	49
Figura 17- Acelerômetro piezométrico.....	50
Figura 18- Banco de ensaios experimentais	53
Figura 19. Procedimentos para a medição de dureza Vickers, Rugosidade $-R_a$ e, também, para a análise metalográfica das peças.....	56
Figura 20- Imagens digitais e análise metalográfica para as amostras (II) e (VII) com o rebolo CBN: (a) e (f) imagem sem processamento; (b) e (g) imagens processadas e (e) e (j) metalografia.....	63
Figura 21- (a) Sinais originais de aceleração referente a região da peça escolhida para análise; (b) STFT de (a). Os quais são correspondentes às amostras (II) e (VII).....	65
Figura 22. Resultado da ROP_{STFT} para os ensaios com rebolo CBN.....	67
Figura 23- RMSE da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte	67
Figura 24- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte	68

Figura 25- RMSE da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte.....	69
Figura 26- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte	69
Figura 27- Espectros de frequência das ROP_{STFT} para os ensaios com o rebolo CBN.....	70
Figura 28. Imagens digitais e análise metalográfica para as amostras II e VIII com o rebolo de óxido de alumínio: (a) e (f) imagem sem processamento; (b) e (g) imagens processadas e (e) e (j) metalografia.....	72
Figura 29- (a) Sinais originais de aceleração referente a região da peça escolhida para análise; (b) STFT de (a) os quais são correspondentes às amostras (II) e (VIII) para o rebolo de óxido de alumínio.....	73
Figura 30. Resultado da ROP_{STFT} para os ensaios com o rebolo de óxido de alumínio.	74
Figura 31- RMSE da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte	75
Figura 32- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e rugosidade em função das profundidades de corte	76
Figura 33- RMSE da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte.....	76
Figura 34- Ângulo de regressão da ROP_{STFT} e dureza em função das profundidades de corte	77
Figura 35- Espectros de frequência das ROP_{STFT} para os ensaios com o rebolo de óxido de alumínio.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Tipos de medidas de rugosidade (MACHADO et al., 2015)	29
Tabela 2- Parâmetros dos Ensaios de Retificação com rebolo CBN.....	53
Tabela 3- Configuração do módulo de vibração	54
Tabela 4- Parâmetros dos ensaios de retificação com rebolo de óxido de alumínio	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT- Associação Brasileira de normas técnicas

CBN - Nitreto cúbico e boro

CIRP – International Academy for Production Engineering (Academia Internacional de Engenharia de Produção)

DFT - Discret Fourier transform (transformada discreta de fourier)

EA – Emissão acústica

FFT- Fast Fourier Transform (transformada rápida de fourier)

HV - Hardness Vichers

IA – Artificial intelligence (inteligência artificial)

OXI - Rebolo de óxido de alumínio

RMS – Root mean Square (valor médio quadrático)

RMSE - Root mean squared error (erro médio quadrático)

ROP - Ratio of power (razão de potência)

SAE - Society of Automotive Engineers

STFT - Sort time fourier transform (transformada de Fourier de curta duração)

TW – Wavelet transform (transformada wavelet)

a Profundidade de corte [μm]

h_{eq} Espessura equivalente de corte [μm]

R_a Rugosidade média aritmética [μm]

R_q Rugosidade média quadrática [μm]

R_t Rugosidade máxima de pico ou vale [μm]

v_{fn}	<i>Velocidade normal [m/s]</i>
v_{fa}	<i>Velocidade axial [m/s]</i>
v_s	<i>Velocidade do rebolo [m/s]</i>
v_w	<i>Velocidade da peça [m/s]</i>
F_t	<i>Força tangencial [N]</i>
F_n	<i>Força normal [N]</i>
F_a	<i>Força axial [N]</i>
U_d	<i>Grau de recobrimento</i>
d_s	<i>Diâmetro externo do rebolo [mm]</i>
n_s	<i>Rotação do rebolo [rpm]</i>
Pot	<i>Potência do processo [watts]</i>
P_{STFT}	<i>Potência calculada a partir da STFT [amostras]</i>
D_1, D_2	<i>Diagonais 1 e 2 oriundas da indentação Vickers</i>
R_1, R_2	<i>Regiões de interesse 1 e 2</i>
m	<i>Amostras</i>
t	<i>Tempo (s)</i>
ω	<i>Frequência angular [rad/s]</i>
$f(t)$	<i>Sinal no domínio do tempo [amostras]</i>
$h(u)$	<i>Função janela no tempo [amostras]</i>
M, N	<i>Número de colunas e de linhas da matriz que descreve a STFT</i>
n_1-n_2	<i>Número de pontos da matriz que descreve a STFT</i>
$X_{n,m}$	<i>K-ésima saída da DTF para cada coeficiente da STFT</i>

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Esta seção discorre sobre importância da automação no processo de retificação, destacando a motivação e a necessidade de monitorar o fenômeno de chatter. Na sequência, são apresentados os objetivos do trabalho, a organização do documento e uma lista de publicações científicas que foram obtidas com os resultados da presente pesquisa.

1.1 Motivação e justificativa

A abordagem tradicional de controle de qualidade consiste na inspeção de produtos produzidos, geralmente amostrados em intervalos regulares, avaliando as características de interesse do produto. Ao monitorar a evolução dessas características, é possível verificar se o processo está realmente sob controle. O monitoramento feito dessa forma, entretanto, é focado na inspeção do produto, que é o resultado final do processo de manufatura. Esse tipo de abordagem é comumente usado na indústria por meio de observações visuais diretas ou de um diagnóstico empírico, porém, dependendo da aplicação, esse procedimento pode apresentar limitações. No caso de limitações, o resultado é um atraso consequente na resposta a erros de processo, que, entretanto, continuou a produzir peças que podem não ser aceitáveis. Esse atraso leva a um desperdício de tempo e materiais, resultando em aumento de custos e redução de produtividade, (MAGGIONI; MARZORATI, 2013).

Por outro lado, os sistemas de controle e inspeção baseados em tecnologias de monitoramento por sinais de sensores possuem uma longa história de uso bem-sucedido em abordagem científica para processos de manufatura. De fato, em processos de manufatura com operações constantes, como os encontrados nas indústrias de usinagem, a abordagem baseada em sinais de sensores físicos pode ser usada para reduzir a variabilidade. Nos últimos anos, com

o advento da indústria 4.0, o estudo de sistemas de monitoramento indireto, ou seja, tecnologias inovadoras com base na análise de sinais de sensores e dados adquiridos durante o processo, recebeu uma atenção considerável. Isto é principalmente devido a um fator importante: ser mais competitivo. Isso, juntamente ao advento da tecnologia de sensores *online*, da automação industrial, e do aumento da capacidade computacional integrada, levaram a um crescimento contínuo de estudos sobre os sistemas de monitoramento em processos de manufatura.

A análise de sinais adquiridos por sensores durante o processo de usinagem, por exemplo, permite reconhecer rapidamente desvios das condições normais de trabalho, o que pode resultar em custos mais baixos e menos desperdício, graças a possíveis ações corretivas automatizadas aplicadas durante o processo. Nesse sentido, os processos de usinagem por abrasão, principalmente as operações de retificação, são amplamente usados na manufatura de componentes que exigem grande precisão e alta qualidade no acabamento. A retificação é um processo que pode fornecer baixos custos para um determinado número de peças. Entretanto, para obter essas vantagens, é necessário assegurar uma configuração (máquina, ferramenta, refrigeração, etc.) adequada. O monitoramento dos processos de retificação convencionais tem dependido, majoritariamente, das qualificações e da experiência do operador humano que determina o tempo de parada de máquina, bem como, a identificação de falhas no processo usando de meios visuais, auditivos e táteis. Sendo assim, uma solução viável para o monitoramento de vários parâmetros do processo de retificação é o uso dos sinais de sensores. Essa nova abordagem permite um controle da influência dos fenômenos físicos na manufatura do componente, de modo a reduzir o tempo de parada de máquina, aumentar a produção, visando reduzir os custos de manufatura, (MAGGIONI; MARZORATI, 2013; ALEXANDRE et al., 2018).

Nesse contexto, muitas abordagens têm sido propostas no processo de retificação para monitorar danos térmicos (AGUIAR et al., 2006a; RIBEIRO et al., 2017b), rugosidade (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2015, 2019a; RIBEIRO et al., 2015) e a condição da ferramenta (rebolo e dressador) (MIRANDA et al., 2015; MOIA et al., 2015; LOPES et al., 2017; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2018b, 2018a), usando principalmente algoritmos avançados de processamento de sinal e inteligência artificial. Para tanto, sinais de diversos sensores físicos, tais como: emissão acústica (EA) (AGUIAR et al., 2006a, 2006b), acelerômetros (vibração) (OLIVEIRA JUNIOR et al., 2015, 2016a, 2016b, 2017, 2019a), dinamômetros (força) e sensores de potência (KWAK; HA, 2004; COUEY et al., 2005; AGUIAR et al., 2006a), e recentemente, transdutores piezelétricos de baixo custo do tipo PZT (zirconato e titanato do

chumbo) (FABIANO et al., 2017; RIBEIRO et al., 2017b; OLIVEIRA JUNIOR et al., 2018c, 2018a, 2019b), têm sido aplicados.

A retificação é um processo de acabamento que faz uso de partículas abrasivas fixas e influenciado por diversos fatores estocásticos que são prejudiciais ao processo e um deles é o fenômeno de *chatter*, o qual tem sido pouco reportado pelas abordagens supracitadas. O fenômeno de *chatter* é definido como vibrações autoexcitadas que ocorrem nos processos de usinagem, (SILVA et al., 2013; YAN; XU; WIERCIGROCH, 2015; AHRENS et al., 2016). Alguns fatores como altas taxas de remoção de material, o desbalanceamento e a excentricidade do rebolo podem contribuir para o surgimento do *chatter*, (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001). No processo de retificação, esse fenômeno geralmente surge por meio de vibrações de maior amplitude, próximas das vibrações harmônicas do rebolo, da peça como mostrado por Gradišek et al. (2003) e, ainda, da máquina-ferramenta e do sistema de fixação, quando projetados ou aplicados inadequadamente. A ocorrência do *chatter* no processo de retificação pode acarretar peças fora dos padrões macro/micro geométricos e dimensionais ou, ainda, danos irreversíveis à superfície da peça. Os métodos tradicionais de monitoramento baseados na experiência do operador não são capazes de identificar o fenômeno de *chatter* sem que danos irreversíveis sejam introduzidos à peça. Assim, surge a necessidade da utilização dos métodos de monitoramento indiretos por sinais de sensores citados anteriormente (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001; GRADIŠEK et al., 2003). Entretanto, a confiabilidade de um sistema automático usando tais métodos depende, também, da seleção correta das técnicas de processamento digital de sinais empregados para extração de características do processo, de modo a implantar um sistema eficaz, (WANG et al., 2001).

A detecção do *chatter*, embora aparente ser uma tarefa simples para um operador treinado, consiste em uma tarefa difícil quando se trata do reconhecimento automático desse fenômeno. Ainda assim, alguns trabalhos científicos foram publicados nos últimos 20 anos descrevendo técnicas e abordagens para detecção de *chatter* em máquinas-ferramentas com particular referência para o processo de retificação (INASAKI; KARPUSCHEWSKI; LEE, 2001). Por exemplo, Inasaki, Karpuschewski e Lee (2001), publicaram o trabalho científico intitulado: “*Grinding Chatter – Origin and Suppression*”, onde os principais mecanismos da ocorrência de *chatter* foram esclarecidos, bem como, as principais dificuldades em detectar antecipadamente esse fenômeno foram apontadas. Neste importante e consolidado estudo, o qual foi publicado na revista *CIRP Annals*, os autores mostram o potencial do uso de sensores avançados para minimização do fenômeno de *chatter*. Além disso, conforme relatado por

Kuljanić, Totis e Sortino (2008), os sensores que têm sido mais utilizados na detecção de *chatter* são dinamômetros, sensores de deslocamento e de aceleração. No que diz respeito às tecnologias de processamento e classificação de sinais de sensores, os métodos de análise domínio da frequência e domínio tempo-frequência (densidade espectral de potência - PSD, transformada rápida de Fourier - FFT e transformada wavelet - WT) têm sido os mais comuns.

Neste contexto, o presente trabalho propôs uma nova técnica de processamento de sinais de aceleração baseada em análise tempo-frequência, por meio de ROP (*ratio of power* - razão de potência) e STFT (*short time Fourier transform* - transformada de Fourier de tempo curto), com vista a extrair informações referentes ao *chatter* no processo de retificação de peças de aço com distintos rebolos. Desta forma, pretende-se validar o método para um sistema automático de monitoramento visando contribuir de forma técnica e científica para detecção do fenômeno de *chatter* da indústria da retificação. É importante mencionar que, pesquisadores da área tem extraído características do *chatter* no domínio da frequência a partir de sinais de aceleração (vibração). Porém, o presente trabalho se diferencia dos demais constantes na literatura, como por exemplo os trabalhos de Ahrens et al. (2013, 2016), Gradišek et al. (2003) e Yan et al. (2014, 2015), devido à utilização de uma nova técnica de processamento de sinais de aceleração, baseada na STFT e na ROP para detectar o fenômeno de *chatter* na retificação de peças de aço, portanto, uma abordagem inédita para o monitoramento desse fenômeno.

1.2 Objetivos

O objetivo desse trabalho é correlacionar uma nova técnica de processamento digital de sinais de aceleração com base na STFT e ROP com as variáveis mecânicas de saída, tais como dureza, rugosidade e metalografia, para caracterização do fenômeno de *chatter* durante o processo de retificação tangencial plana de peças de aço.

1.3 Organização do trabalho

A presente tese está organizada em cinco capítulos, sendo que:

- O primeiro capítulo refere-se introdução do trabalho, o qual apresentou a motivação do presente estudo e discorreu sobre a importância do monitoramento do processo de

retificação em termos econômicos. Nesse capítulo, o problema em questão foi abordado, ou seja, a ocorrência do fenômeno de *chatter*. Para minimização deste problema, os objetivos do presente trabalho foram apresentados. Ao final deste capítulo, uma lista de trabalhos científicos publicados, fruto dos resultados do presente estudo, é apresentada.

- O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte, bem como, sobre os principais aspectos teóricos do escopo do presente trabalho. Nesse sentido, as principais características e variáveis mecânicas do processo de retificação serão introduzidas, assim como, o princípio de ocorrência do fenômeno de *chatter* será explicado. Uma revisão das principais tecnologias de detecção e monitoramento do fenômeno *chatter* baseadas no processamento de sinais de sensores também será reportada neste capítulo.
- No terceiro capítulo, os materiais e equipamentos utilizados, bem como, a metodologia empregada para realização dos ensaios experimentais de retificação, são detalhados. Nesse sentido, serão descritos os procedimentos adotados para: a coleta dos sinais de aceleração, as medições da rugosidade e dureza Vickers; a análise metalográfica das superfícies das peças; e finalmente, o processamento digital dos sinais de aceleração para a detecção do fenômeno de *chatter* no processo de retificação.
- No quarto capítulo, os resultados para os ensaios experimentais e para os ensaios de verificação do método proposto serão sequencialmente apresentados e discutidos.
- Finalmente, as conclusões do trabalho, bem como as perspectivas para pesquisas futuras, com base nos resultados obtidos até o presente momento, serão apresentadas no quinto capítulo.

1.4 Publicações obtidas

[1] Thomazella, R.; Lopes, W. N. ; Alexandre, F. A.; Dotto, F. R. L. ; Aguiar, P. R. ; Pontes Junior, B. R. ; Bianchi, E. C. ; Vieira, M. A. A. . **“Detecção Do Fenômeno de *Chatter* no Processo De Retificação por meio de Análise Tempo-Frequência”**. In: *X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)*,2018, Salvador, BA.

[2] Thomazella, R.; Lopes, W. N.; Alexandre, F. A.; Götz, R.; Aguiar, P. R.; Bianchi, E. C. **“Técnicas De Processamento Digital de Sinais de Aceleração para a detecção de Vibração**

Auto-Excitada no Processo de Retificação". In: XXXVIII *International SODEBRAS Congress and SODEBRAS Journal*, Florianópolis, 2017.

[3] W. N. Lopes *Et Al.*, "**Monitoring of Self-Excited Vibration in Grinding Process Using Time-Frequency Analysis of Acceleration Signals**" *2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON)*, São Paulo, Brazil, 2018, pp. 659-663. DOI: 10.1109/Induscon.2018.8627198.

[4] Thomazella, R.; Lopes, W. N.; Aguiar, P. R.; Alexrandre, F. A.; Fiocchi, A. A.; Bianchi, E. C. "**Digital Signal Processing for Self-Vibration Monitoring in Grinding: A New Approach Based on the Time-Frequency Analysis of Vibration Signals**" *Measurement Journal* (aceito para publicação, 2019).

“Ms. Ref. No.: MEAS-D-19-00413R1

Title: Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals *Measurement*

I am pleased to confirm that your paper "Digital signal processing for self-vibration monitoring in grinding: A new approach based on the time-frequency analysis of vibration signals" has been accepted for publication in *Measurement*.

Thank you for submitting your work to this journal.

With kind regards,

Luca De Vito, Ph.D.

Editor

Measurement”

Capítulo 5

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho, bem como, as perspectivas para pesquisas futuras com base nos resultados obtidos até o presente momento.

5.1 Conclusões

O objetivo do presente trabalho foi correlacionar uma nova técnica de processamento digital de sinais de aceleração com base na STFT e ROP com as variáveis mecânicas de saída, tais como dureza, rugosidade e metalografia, buscando a caracterização do fenômeno de *chatter* durante o processo de retificação tangencial plana de peças de aço. A metodologia utilizada foi baseada em ensaios experimentais de retificação tangencial plana de peças de aço ABNT 1045. Nesse contexto, sinais de aceleração foram coletados durante os experimentos por meio de um acelerômetro piezelétrico fixado na máquina. Para caracterização das peças após a retificação, diversos testes foram realizados, tais como: rugosidade, dureza Vickers e análise metalográfica. Para extração de características, foi realizado o processamento digital dos sinais de aceleração por meio da nova técnica proposta: ROP_{STFT} . Com auxílio da FFT e das métricas RMSE e ângulo de regressão, a técnica proposta foi capaz de detectar com sucesso a ocorrência de *chatter* durante o processo de retificação. O método proposto foi verificado para um rebolo diferente daquele usado nos ensaios experimentais a fim de avaliar a eficácia da técnica para uma situação diferente. A faixa de frequência de 3 kHz a 4 kHz apresentou uma forte correlação com as variáveis de mecânicas de saída do processo (rugosidade, dureza e metalografia), as quais caracterizaram a ocorrência de *chatter*. Assim, foram identificadas por meio da

metalografia, para ambos ensaios de com rebolo CBN e rebolo de óxido de alumínio (ensaios de verificação), alterações microestruturais nas peças devido a ocorrência do *chatter* conforme a profundidade de corte aumentava. As marcas características do *chatter* impressas na superfície das peças seguiram um padrão de repetição temporal regular de aproximadamente 35 ms, o que era equivalente à frequência angular do rebolo de 28 Hz. Esse padrão de comportamento pode ser comprovado por meio do cálculo da ROP_{STFT} em ambos ensaios de com rebolo CBN e rebolo de óxido de alumínio (ensaios de verificação), ou seja, para diferentes situações, obtendo a frequência de 29,5 Hz. Com isso, o erro percentual representado foi de aproximadamente 5,36%.

Por meio do cálculo da STFT, foi possível observar que as frequências que influenciam o processo de retificação, ou seja, as frequências que se mostraram mais expressivas em termos de energia, foram múltiplas da fundamental (de rotação do rebolo). Dentre as frequências mais expressivas pode-se destacar as harmônicas de 1.980 kHz e 2.010 kHz. A métrica ROP trouxe resultados significantes, pois demonstrou que o aumento da razão de potência do sinal de aceleração está diretamente relacionado com as variáveis de mecânicas de saída do processo (rugosidade, dureza e metalografia) que caracterizaram a ocorrência do *chatter*. Dessa forma, ao aumentar a profundidade de corte, foi constatado que ocorria a elevação da força de corte, bem como, um conseqüente aumento na incidência de *chatter*.

O aumento da rugosidade está diretamente relacionado com o aumento da profundidade de corte; porém, observou-se no presente estudo que tanto o ângulo de inclinação das retas de regressão quanto os valores de RMSE acompanharam a tendência dos valores de rugosidade, de modo que se pode inferir que a rugosidade pode ser monitorada aplicando-se a ROP_{STFT} em uma banda de frequência apropriada para os sinais de aceleração. Foi demonstrando ainda, que esta banda de frequência possuía relação direta e significativa com as outras variáveis mecânicas (dureza e metalografia) que caracterizaram o fenômeno de *chatter*. Por outro lado, a dureza das peças manteve-se na faixa de 400 HV a 600 HV em ambos ensaios de com rebolo CBN e rebolo de óxido de alumínio (ensaios de verificação), enquanto o ângulo de inclinação das retas de regressão e os valores de RMSE se elevaram conforme a profundidade de corte aumentava. Logo, infere-se que, ao definir um limiar (que varia de acordo com o ensaio de retificação, tipo de rebolo, etc) de máxima inclinação para a reta de regressão e para o RMSE, é possível evitar que danos ocorram nas peças durante a retificação. Essa inferência demonstra que o método proposto é capaz de auxiliar um sistema de monitoramento online do processo de

retificação, tornando a operação mais robusta, confiável e, conseqüentemente, contribuindo para a otimização dela.

É importante ressaltar que, em aplicações que demandem alta resoluções tanto no tempo quanto na frequência, como por exemplo: a identificação de transitórios, a ROP_{STFT} não é indicada, uma vez que a técnica proposta possui as limitações de resoluções tempo-frequência da STFT. Entretanto, para esses casos de dinâmica muito rápida, a ROP pode ser computada a partir dos coeficientes de transformadas que não possuem essas limitações, como exemplo, a transformada *wavelet*. É importante mencionar também que não pode ser afirmado que as frequências mais expressivas, obtidas a partir da ROP_{STFT} , foram as responsáveis pela detecção do fenômeno de *chatter*, uma vez que as frequências naturais do sistema (conjunto máquina, rebolo e peça) não foram levantadas no presente estudo. Porém, foi constatado uma forte correlação entre a técnica de processamento de sinais proposta (ROP_{STFT}) e as variáveis mecânicas de saída (rugosidade, dureza e metalografia), as quais caracterizaram de fato a ocorrência do *chatter*.

5.2 Trabalhos futuros

Em trabalhos futuros pode-se investigar a eficiência da técnica proposta para monitorar o fenômeno do *chatter* em altas frequências (frequências acima de 20kHz). Ou seja, uma vez que a banda de frequência analisada seja múltipla da frequência de rotação do rebolo e possua relação direta com a ocorrência do fenômeno de *chatter*, sensores de emissão acústica, por exemplo, poderão ser utilizados para o caso de frequências mais altas com base na técnica proposta. Ressalta-se que a abordagem relatada nesse trabalho é inicial e não pode ser generalizada. Para uma verificação mais ampla da técnica proposta, estudos adicionais em outras condições de usinagem se fazem necessários, tal como na análise de textura superficial, por exemplo. Além disso, as frequências naturais do sistema a ser estudado deverão ser levantadas a fim de se obter as frequências de *chatter* quando esse fenomeno ocorrer e correlaciona-las com as frequências obtidas a partir da ROP_{STFT} .

REFERÊNCIAS

ABNT-NBR-ISO-4288. Especificações geométricas de produto (GPS) Rugosidade: Método do perfil. **Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**, 1996.

AGUIAR, P. R. De; DOTTO, F. R. L.; BIANCHI, E. C.; SERNI, P. J. A.; THOMAZELLA, R. Automatic System for Thermal Damage Detection in Manufacturing Process With Internet Monitoring. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 1, 2006a.

AGUIAR, P. R.; CRUZ, C. E. D.; PAULA, W. C. F.; BIANCHI, E. C.; THOMAZELLA, R.; DOTTO, F. R. L. Neural network approach for surface roughness prediction in surface grinding. In: The IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications (AIA 2007), **Anais...**2007.

AGUIAR, P. R.; SERNI, P. J. A.; DOTTO, F. R. L.; BIANCHI, E. C. In-process grinding monitoring through acoustic emission. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 28, n. 1, p. 1–4, 2006b. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-58782006000100014&lng=en&nrm=iso&tlng=en>.

AHRENS, M.; DAGEN, M.; DENKENA, B.; ORTMAIER, T. An Active Damping Method for Chatter Vibration in Plunge Grinding Using Electromagnetic Actuators. **Procedia CIRP**, v. 46, p. 197–200, 2016.

AHRENS, M.; FISCHER, R.; DAGEN, M.; DENKENA, B.; ORTMAIER, T. Abrasion monitoring and automatic chatter detection in cylindrical plunge grinding. **Procedia CIRP**, v. 8, p. 374–378, 2013.

ALBIZURI, J.; FERNANDES, M. H.; GARITAONANDIA, I.; SABALZA, X.; URIBE-ETXEBERRIA, R.; HERNÁNDEZ, J. M. An active system of reduction of vibrations in a centerless grinding machine using piezoelectric actuators. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 10, p. 1607–1614, ago. 2007.

ALEXANDRE, F. A.; LOPES, W. N.; DOTTO, F. R. L.; FERREIRA, F. I.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; LOPES, J. C.; AGUIAR, P. R. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel using AE and fuzzy model. **The Internacional Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 96, p. 67–79, 2018.

ALEXANDRE, F.; LOPES, W.; FERREIRA, F.; DOTTO, F.; AGUIAR, P.; BIANCHI, E. Chatter vibration monitoring in the surface grinding process through digital signal processing of acceleration signal. In: Proceedings of 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications, Basel, Switzerland. **Anais**. Basel, Switzerland: MDPI, nov. 2017.

ASTM-E92. Standard test methods for vickers hardness and knoop hardness of metallic

materials. [s.l.] **ASTM International**, West Conshohocken, PA, 2017.

BADGER, J.; MURPHY, S.; O'DONNELL, G. The effect of wheel eccentricity and run-out on grinding forces, waviness, wheel wear and chatter. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 10–11, p. 766–774, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.06.006>>.

BZYMEK, M. Z.; SONG, G.; D. HOWES, T.; E. GARRETT, R. **Design of flexible grinding wheel with variable hub thickness**. *Journal of Engineering for Industry* 116(2):260. 1994.

BIANCHI, E. C.; FERNANDES, O. C.; MOGAMI, O.; DA SILVA JR., C. E.; VALARELLI, I. de D.; AGUIAR, P. R. Behavior analysis of conventional grinding wheel in brittle and ductile steels machining. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences**, v. 19, p. 410–425, 1997.

BILISOVÁ, A.; BILOS, J. **Vibration diagnostics**. [s.l.] Investments in education development - European, 2012.

BLACK, J. T.; KOHSER, R. A. **De garmo's materials and processes in manufacturing**. Wiley, 2011.

BOEKEL, A. M. Van. Caracterização dos Ciclos Térmicos em Soldagem Circunferencial de Aços da classe API X100. p. 8, 2013.

BRAND, G. T.; MATHIAS, M. H. Vibrações mecânicas. In: 2010.

BRINKSMEIER, E. H. K.; TONSHOFF, C.; CZENKUSCH, C.; HEINZEL, C. Modelling and optimization of grinding processes. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 9, n. 4, p. 303–314, 1998.

CHEN, Y.; CHEN, X.; XU, X.; YU, G. Effect of Energy Consumption in the Contact Zone on Machining Condition Optimization in Precision Surface Grinding. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 64, n. 4, p. 233–244, 2018.

CHIOU, Y. S.; CHUNG, E. S.; LIANG, S. Y. Analysis of Tool Wear Effect on Chatter. **Science**, v. 37, n. 4, p. 391–404, 1995.

OLIVEIRA JUNIOR, P. C.; RIBEIRO, D. M. S.; MARCHI, M.; RODRIGUES, A. C.; FRANÇA, T. V.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. STUDY OF SURFACE ROUGHNESS OF GROUND CERAMICS BY VIBRATION SIGNAL ANALYSIS. **ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, v. 23, p. 1–10, 2015.

COUEY, J. a.; MARSH, E. R.; KNAPP, B. R.; VALLANCE, R. R. Monitoring force in precision cylindrical grinding. **Precision Engineering**, v. 29, n. 3, p. 307–314, jul. 2005. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0141635905000061>>. Acesso em: 25 ago. 2014.

DING, W.; LINKE, B.; ZHU, Y.; LI, Z.; FU, Y.; SU, H.; XU, J. Review on monolayer CBN superabrasive wheels for grinding metallic materials. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 30,

n. 1, p. 109–134, fev. 2017.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 8ª edição ed. [s.l.] Ed. Artliber, 2013.

ENRWISTLE, R.; STONE, B. FUNDAMENTAL ISSUES IN SELF-EXCITED CHATTER IN GRINDING. **Journal of Machine Engineering**, v. 13, n. 3, p. 26–50, 2013.

FABIANO, L. F. G.; RIBEIRO, D. M. S.; OLIVEIRA JUNIOR, P. C.; DA SILVA, K. L. O.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Low-cost piezoelectric diaphragm evaluation in the monitoring of the flat tangential grinding process. **Revista Materia**, v. 22, n. 4, 2017.

FREIRE, J. M. **Máquinas limadoras e retificadoras**. Editora S. 1975.

FUKUGAUCHI, C. S. F. **Metodologia Para Caracterização Metalográfica De Um Aço Trip Por Microscopia Óptica**. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá Guaratinguetá. [s.n], 122 f, 2010.

GARRIDO, M. The Feedforward Short-Time Fourier Transform. **IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs**, v. 63, n. 9, p. 868–872, set. 2016.

GONZÁLEZ-BRAMBILA, O.; RUBIO, E.; JÁUREGUI, J. C.; HERRERA-RUIZ, G. Chattering detection in cylindrical grinding processes using the wavelet transform. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 15, p. 1934–1938, 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695506000253>>.

GRADIŠEK, J.; BAUS, A.; GOVEKAR, E.; KLOCKE, F.; GRABEC, I. Automatic chatter detection in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 14, p. 1397–1403, nov. 2003.

GRAF, W. **Cylindrical grinding**. [s.l.] WST Winterthur Schleiftechnik AG, 2004.

HE, B.; WEI, C.; DING, S.; SHI, Z. A survey of methods for detecting metallic grinding burn. **Measurement**, v. 134, p. 426–439, fev. 2019.

HECKER, R. L.; LIANG, S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 43, n. 8, p. 755–761, jun. 2003. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695503000555>>. Acesso em: 27 ago. 2014.

HEGEMAN, J. **Fundamentals of grinding: surface conditions of ground materials**. 2000. Groningen, 2000.

HOCKAUF, R.; ASADI, E.; DENKENA, B.; GROVE, T.; WURZ, M. Grinding of riblets with “beaver tooth” multi-layer tools. **Procedia CIRP**, v. 71, p. 155–159, 2018.

INASAKI, I. Monitoring and Optimization of Internal Grinding Process. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 40, n. 1, p. 359–362, 1991.

INASAKI, I.; KARPUSCHEWSKI, B.; LEE, H.-S. Grinding Chatter – Origin and Suppression. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, n. 2, p. 515–534, 2001.

JIANMING, S.; YONGXIANG, L.; GONG, W.; MENGYING, Z. Milling tool wear monitoring through time-frequency analysis of sensory signals. **2016 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management, ICPHM 2016**, p. 1–5, 2016.

KIM, B. S.; LEE, S. H.; LEE, M. G.; NI, J.; SONG, J. Y.; LEE, C. W. A comparative study on damage detection in speed-up and coast-down process of grinding spindle-typed rotor-bearing system. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 187–188, p. 30–36, 2007.

KIM, H.; MELHEM, H. Fourier and Wavelet Analyses for Fatigue Assessment of Concrete Beams. **Experimental Mechanics**, v. 43, n. 3, p. 131–140, 2003.

KJÆR, B. &. Vibration Measurement and Analysis. In: [s.l: s.n.]785.

KULJANIĆ, E.; TOTIS, G.; SORTINO, M. Vibrations and Chatter in Machining: State of the Art and New Approaches. **Advanced Manufacturing Systems and Technology**, v. 15, n. 36, 2008.

KWAK, J.; HA, M. Detection of dressing time using the grinding force signal based on the discrete wavelet decomposition. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 23, n. 1, p. 87–92, 2004.

LACERDA, H. B.; LIMA, V. T. Evaluation of Cutting Forces and Prediction of Chatter Vibrations in Milling. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXVI, n. 1, p. 74–81, 2004.

LACH-DIAMANT. **Diamond Dressing Tools Catalogues**.

LI, Z.; DING, W.; SHEN, L.; XI, X.; FU, Y. Comparative investigation on high-speed grinding of TiCp/Ti–6Al–4V particulate reinforced titanium matrix composites with single-layer electroplated and brazed CBN wheels. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 29, n. 5, p. 1414–1424, out. 2016.

LOPES, W. N.; ISAAC FERREIRA, F.; APARECIDO ALEXANDRE, F.; SANTOS RIBEIRO, D. M.; CONCEIÇÃO JUNIOR, P. de O.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Digital signal processing of acoustic emission signals using power spectral density and counts statistic applied to single-point dressing operation. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 11, n. 8, p. 631–636, 21 mar. 2017. Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-smt.2016.0317>>.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3a Edição ed. São Paulo: Editora Blucher, 2015.

MADANCHI, N.; WINTER, M.; HERRMANN, C. Cutting Fluid Drag-out and Exhaust Air in Grinding Processes: Influence on the Eco-efficiency. **Procedia CIRP**, v. 29, p. 329–334, 2015.

MAGGIONI, M.; MARZORATI, E. **In-process quality monitoring via sensor data fusion: chatter control in grinding**. 2013. Politecnico di Milano, 2013.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives**. 2^a ed ed. New York: Industrial Press Inc, 2008.

MAMANI, J. D. S. **QUANTIFICAÇÃO por microscopia digital do microconstituente austenita-martensita em aço de baixa liga**. 2013. PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, Brazil, 2013.

MARINESCU, I.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; BRIAN ROWE, W.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. 1a ed ed. [s.l.] CRC Press, 2006. v. 20061850

MARTINS, C. H. R.; AGUIAR, P. R.; FRECH, A.; BIANCHI, E. C. **Neural networks models for wear patterns recognition of single-point dresser**. [s.l.] IFAC, 2013. v. 46

MARTINS, C. H. R.; AGUIAR, P. R.; FRECH, A.; BIANCHI, E. C. Tool Condition Monitoring of Single-Point Dresser Using Acoustic Emission and Neural Networks Models. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 63, n. 3, p. 667–679, 2014. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6632902/>>.

MCFARLAND, D.; E. BAILEY, G.; D. HOWES, T. **The design and analysis of a polypropylene hub cbn wheel to suppress grinding chatter**. Journal of Manufacturing Science and Engineering 121(1), 1999.

MIRANDA, H. I.; ROCHA, C. A.; OLIVEIRA JUNIOR, P.; MARTINS, C.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Monitoring single-point dressers using fuzzy models. In: Procedia CIRP 33, 2015, 281-286.

MOIA, D. F. G.; THOMAZELLA, I. H.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; MARTINS, C. H. R.; MARCHI, M. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel in dressing operation using acoustic emission and neural networks. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 37, n. 2, p. 627–640, 2015. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s40430-014-0191-6>>.

MTS-SYSTEMS-CORPORATION. **The Modal Shop - Accelerometer Internal Structure**. Disponível em: <<http://www.modalshop.com/calibration.asp?ID=176>>. Acesso em: 31 mar. 2019.

NSI/ASME-B46.1, “Surface Finish Metrology Tutorial.” **NIST**, pp. 1–153, 1985.

OLIVEIRA, J. F. G. de; DORNFELD, D. A. Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 50, n. 1, p. 217–220, 2001.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; AGUIAR, P. R.; FOSCHINI, C. R.; FRANÇA, T. V.; RIBEIRO, D. M. S.; FERREIRA, F. I.; LOPES, W. N.; BIANCHI, E. C. Feature extraction using frequency spectrum and time domain analysis of vibration signals to monitoring advanced ceramic in grinding process. **IET Science, Measurement & Technology**, v. 13, n. 1, p. 1–8, 1 jan. 2019

OLIVEIRA JUNIOR, P. C.; MARCUS, D. M.; FRANÇA, T. V.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Study of Surface Roughness Of Ground Ceramics By Vibration Signal Analysis. **ABCM International Congress of Mechanical Engineering**, v. 23, p. 1–10, 2015.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; CONTE, S.; M.D'ADDONAB, D.; R.AGUIAR, P.; G.BAPTISTA, F.; C.BIANCHI, E.; TETI, R. Damage patterns recognition in dressing tools using PZT-based SHM and MLP networks. **Procedia CIRP**, v. 79, p. 303–307, 2019.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; D'ADDONA, D.; AGUIAR, P.; TETI, R. Dressing Tool Condition Monitoring through Impedance-Based Sensors: Part 2—Neural Networks and K-Nearest Neighbor Classifier Approach. **Sensors**, v. 18, n. 12, p. 4453, 16 dez. 2018a. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/18/12/4453>>.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; MARCHI, M.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C.; FRANCA, T. V. The correlation of vibration signal features in grinding of advanced ceramics. **IEEE Latin America Transactions**, v. 14, n. 9, 2016a.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; MARCHI, M.; MARTINS, C. H. R.; D'ADDONA, D.; DE AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Spectral estimation of vibration signal for monitoring the wear of single-point dresser. **Revista Materia**, v. 21, n. 4, 2016b.

OLIVEIRA JUNIOR, P. O.; FERREIRA, F. I.; AGUIAR, P. R.; BATISTA, F. G.; BIANCHI, E. C.; DADDONA, D. M. Time-domain Analysis Based on the Electromechanical Impedance Method for Monitoring of the Dressing Operation. In: *Procedia CIRP* 67, 2018, 319-324.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; RUZZI, R. de S.; LOPES, W. N.; ALEXANDRE, F. A.; BAPTISTA, F. G.; AGUIAR, P. R. de; CARLOS, B. E. A New Approach For Dressing Operation Monitoring Using Voltage Signals Via Impedance-Based Structural Health Monitoring. **KnE Engineering**, p. 942–952, 2018c.

OLIVEIRA JUNIOR, P.; SOUZA, R. V; MARTINS, C. H.; AGUIAR, P. R.; FERREIRA, F. I.; BIANCHI, E. C. Wear Monitoring of Single-Point Dresser in Dry Dressing Operation Based on Neural Models. **Proceedings of the IASTED International Conference Modelling, Identification and Control (MIC 2017)**, v. 36, n. Mic, p. 178–185, 2017.

OTTO, A.; RADONS, G. **The influence of tangential and torsional vibrations on the stability lobes in metal cutting**. *Nonlinear Dynamics* 82(4), 2015.

PAPANIKOLAOU, M.; SALONITIS, K. Fractal roughness effects on nanoscale grinding. **Applied Surface Science**, v. 467–468, p. 309–319, fev. 2019.

PATNAIK DURGUMAHANTI, U. S.; SINGH, V.; VENKATESWARA RAO, P. A New Model for Grinding Force Prediction and Analysis. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 3, p. 231–240, mar. 2010.

PUERTO, P.; FERNÁNDEZ, R.; MADARIAGA, J.; ARANA, J.; GALLEGO, I. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, v. 63, n. 1996, p. 174–182, 2013. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.181>>.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 363–376, maio 2011.

RABIEY, M.; ZHI WEI, J. L. Simulation of workpiece surface roughness after flat grinding by electroplated wheel. **Procedia CIRP**, v. 77, p. 303–306, 2018.

RIBEIRO, D. M. S.; AGUIAR, P. R.; FABIANO, L. F. G.; D'ADDONA, D. M.; BAPTISTA, F. G.; BIANCHI, E. C. Spectra Measurements Using Piezoelectric Diaphragms to Detect Burn in Grinding Process. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 66, n. 11, p. 3052–3063, nov. 2017

RIBEIRO, D. M. S.; OLIVEIRA JUNIOR, P. O.; SODÁRIO, R. D.; MARCHI, M.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Low-Cost Piezoelectric Transducer Applied To Workpiece Surface Monitoring in Grinding Process. **ABC International Congress of Mechanical Engineering - COBEM**, v. 23, n. 1–10, 2015.

ROWE, W. **Principles of modern grinding technology**. 2a Edição ed. [s.l.] Elsevier, 2014.
SAINT-GOBAIN. **Abrasives company website, internet resource**.

SEXTON, J. S.; HOWES, T. D.; STONE, B. J. The Use of Increased Wheel Flexibility to Improve Chatter Performance in Grinding. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 196, n. 1, p. 291–300, jun. 1982.

SHARMA, G. K.; KUMAR, A.; BABU RAO, C.; JAYAKUMAR, T.; RAJ, B. Short time Fourier transform analysis for understanding frequency dependent attenuation in austenitic stainless steel. **NDT & E International**, v. 53, p. 1–7, jan. 2013.

SHIMAUCHI, S.; KUDO, S.; KOIZUMI, Y.; FURUYA, K. On relationships between amplitude and phase of short-time Fourier transform. In: 2017 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), **Anais...IEEE**, mar. 2017.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 61, p. 27–47, 2012.

SILVA, L. R.; CORREA, E. C. S.; BRANDÃO, J. R.; ÁVILA, R. F. Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. **Journal of Cleaner Production**, 2013.

SNOEYS, R.; BROWN, D. Dominating parameters in grinding wheel and workpiece regenerative chatter. In: Proceedings of the 10th International Machine Tool Design and Research Conference, **Anais...1969**.

SOULAMI, A.; SIL CHOI, K.; LIU, W. N.; SUN, X.; A. KHALEEL, M. **Characterization of the fracture toughness of trip 800 sheet steels using microstructure-based finite element analysis**. SAE Technical Papers. 2009.

STONE, B. **Chatter and machine tools**. Cham: Springer International Publishing, 2014.

SUBHASHREE, R.; PREETHI, C. S.; SUPRIYA, P. Fault distance identification in transmission line using STFT algorithm. In: 2016 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI), **Anais...IEEE**, jan. 2016.

SUN, C.; DENG, Y.; LAN, D.; XIU, S. Modeling and predicting ground surface topography on grinding chatter. **Procedia CIRP**, v. 71, p. 364–369, 2018a.

SUN, C.; DUAN, J.; LAN, D.; LIU, Z.; XIU, S. Prediction about ground hardening layers distribution on grinding chatter by contact stiffness. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 18, n. 4, p. 1626–1642, set. 2018b.

SWEENEY, G.; LAMB, E. J.; LIMB, M. E. A rig to investigate both cylindrical and external grinding under steady and vibrational conditions and some preliminary results appertaining to vibrational grinding as a production technique. **International Journal of Machine Tool Design and Research**, v. 10, n. 2, p. 161–178, jun. 1970.

TANAKA, M.; KAMIYA, H. Analysis of the grinding of toner sheets using Vickers hardness as an index of grindability. **Powder Technology**, v. 164, n. 2, p. 82–88, maio 2006.

TANGJITSITCHAROEN, S.; SENJUNTICHAI, A. In-Process Chatter Detection in Surface Grinding. **MATEC Web of Conferences**, v. 28, p. 02001, out. 2015.

TETI, R. A Review of Tool Condition Monitoring Literature Database. **CIRP Annals**, v. 44, n. 2, p. 659–666, 1995.

TETI, R. Advanced IT Methods of Signal Processing and Decision Making for Zero Defect Manufacturing in Machining. **Procedia CIRP**, v. 28, p. 3–15, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2015.04.003>>.

TETI, R.; JEMIELNIAK, K.; O'DONNELL, G.; DORNFELD, D. Advanced monitoring of machining operations. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 59, n. 2, p. 717–739, jan. 2010. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0007850610001976>>. Acesso em: 16 jul. 2014.

TIAN, W. **Signature analysis of od grinding processes with applications in monitoring and diagnosis**. 2009. Worcester Polytechnic Institute, 2009.

TONSHOFF, H. K.; FRIEMUTH, T.; BECKER, J. C. Process Monitoring in Grinding. In: Annals of the CIRP 51 (2), **Anais...2002**.

TÖNSHOFF, H. K.; PETERS, J.; INASAKI, T.; PAUL, T. Modelling and Simulation of Grinding Processes. **Annals of the CIRP**, v. 41, n. 2, p. 677–688, 1992.

VANDER VOORT, G. **Color metallography vol. 9 asm handbook**. 2004.

VIEIRA, F. Métodos e técnicas de análise de vibração. 2011. p. 1–22.

WANG, W.; LIU, F.; LIU, Z.; YUN, C. Prediction of depth of cut for robotic belt grinding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 91, n. 1–4, p. 699–

708, jul. 2017.

WANG, Z.; WILLETT, P.; DEAGUIAR, P. R.; WEBSTER, J. Neural network detection of grinding burn from acoustic emission. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 41, n. 2, p. 283–309, 2001.

WARNECKE, G.; BARTH, C. Optimization of the Dynamic Behavior of Grinding Wheels for Grinding of Hard and Brittle Materials Using the Finite Element Method. **CIRP Annals**, v. 48, n. 1, p. 261–264, 1999.

WEBSTER, J.; DONG, W.; LINDSAY, R. Raw acoustic emission signal analysis of grinding process. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 45, n. 1, p. 335–340, 1996.

XU, L. M.; FAN, F.; ZHANG, Z.; CHAO, X. J.; NIU, M. Fast on-machine profile characterization for grinding wheels and error compensation of wheel dressing. **Precision Engineering**, v. 55, p. 417–425, jan. 2019.

YAN, S.; XU, X.; YANG, Z.; ZHU, D.; DING, H. An improved robotic abrasive belt grinding force model considering the effects of cut-in and cut-off. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 37, p. 496–508, jan. 2019.

YAN, Y.; XU, J.; WIERCIGROCH, M. Chatter in a transverse grinding process. **Journal of Sound and Vibration**, v. 333, n. 3, p. 937–953, fev. 2014.

YAN, Y.; XU, J.; WIERCIGROCH, M. Non-linear analysis and quench control of chatter in plunge grinding. **International Journal of Non-Linear Mechanics**, v. 70, p. 134–144, 2015.
YAN, Y.; XU, J.; WIERCIGROCH, M. Influence of Workpiece Imbalance on Regenerative and Frictional Grinding Chatters. **Procedia IUTAM**, v. 22, p. 146–153, 2017.

YAO, Z.; MEI, D.; CHEN, Z. On-line chatter detection and identification based on wavelet and support vector machine. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 210, n. 5, p. 713–719, 2010.

YIZE-MOULD-CO. **Professional production of high precision mould components: Surface Grinding.**

YU, H.; LU, Y.; WANG, J. Study on wear of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. **Wear**, v. 358–359, p. 89–96, jul. 2016.

ZHANG, J.-Z.; TAN, X.-M.; LIU, B.; ZHU, X.-D. Investigation for convective heat transfer on grinding work-piece surface subjected to an impinging jet. **Applied Thermal Engineering**, v. 51, n. 1–2, p. 653–661, mar. 2013.

ZHOU, K.; DING, H. H.; WANG, W. J.; WANG, R. X.; GUO, J.; LIU, Q. Y. Influence of grinding pressure on removal behaviours of rail material. **Tribology International**, fev. 2019.